

Майстер-клас в

УНТЦ, Київ

Аналіз факела

Анджело Мінотті, PhD

22 травня 2019 р.

Зміст

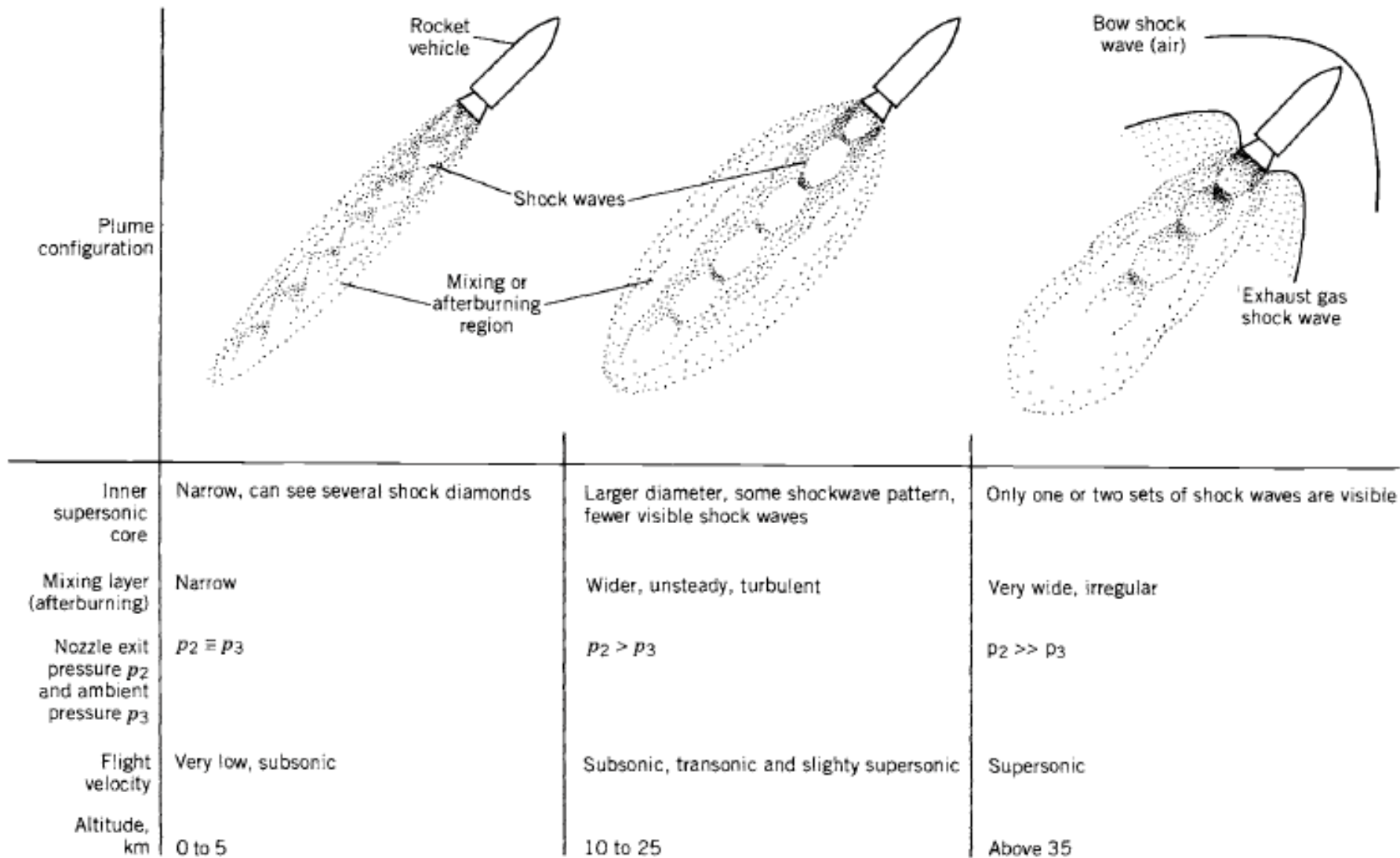
- Зміна конфігурації факела зі зміною висоти
- Дим
- Видимість та випромінювальна здатність факела
- Дослідження прикладів Північної Кореї:
 - Пуккиксон-2;
 - Хвасон-12;
 - Хвасон-14.
- Теплопередача випромінюванням та інфрачервона сигнатура: теорія

Чинники, які впливають на факел

Видимість та димність факела, а також інші його характеристики залежать, поміж іншим, від:

- Траєкторії польоту;
- Швидкості польоту;
- Висоти;
- Погодних умов (вологості, хмарності, вітру тощо);
- Конфігурації апарата;
- Виду палива.

Зміна конфігурації факела зі зміною висоти



- З висотою зростає довжина і діаметр **видимого факела**.
- Факел форсажу (багаті паливом продукти згоряння і повітря) знаходиться у зоні змішування.
- Вище 200 км форсаж відсутній (немає кисню).

Дим

- Дими перебивають передачу оптичних сигналів, і тому їх легко виявити;
- **Первинний дим** складається з великої кількості дуже **малих твердих частинок**, зважених у газі;
- Палива, які мають у своєму складі Al, Al₂O₃, Zr, Fe₂O₃ (модифікатори інтенсивності горіння) або інші метали, утворюють видимі хмари з мікрочастинок суцільного металу або оксиду металу (*первинний дим*);
- Частинки можуть слугувати центром конденсації вологи (у насиченому повітрі, за високої вологості та низької температури);
- Частинки вуглецю або сажі можуть утворюватися з різних твердих видів палива і з рідкого палива на основі вуглеводнів;
- **Вторинний дим** – скупчення **конденсованих дрібних крапель рідини**, зважених у газі, наприклад, хмари з конденсованої рідини або туман.
- Двокомпонентне паливо, у тому числі модифіковане октогеном, гексогеном або композитами на основі нітрату амонію, практично бездимне (первинний дим відсутній, однак за несприятливих погодних умов може утворюватися вторинний дим): відсутні частинки Al, низький рівень зважених частинок у вихлопних газах;
- Паливо, у якому $1 < Al\% < 6$, мають ледве видимий первинний дим, однак за несприятливих погодних умов можуть конденсувати щільний вторинний дим;
- Тверді види палива містять 5-35% H₂O; рідкі види палива – до 80%.

Випромінювальна здатність і видимість факела

Основне випромінювання виділяється у інфрачервоному спектрі, дещо менше – в ультрафіолетовому спектрі і порівняно мала енергія – у видимому спектрі.

H₂-O₂: містить, головним чином, випаровування води та водню (з незначним % O₂ і розкладених сполук) – у основному, пара; сильне випромінювання у діапазонах 2,7, 6,3 μм (ІЧ-зона води) та 122 нм (УФ-зона H₂); **фактично прозорий або безбарвний** (сильні випромінювання у видимому діапазоні відсутні, **однак у найгарячіших зонах може спостерігатися розкладання газових сполук та хімічна люмінесценція, які утворюють бліду рожево-оранжеву хвилю з білою скелетною структурою**).

N₂O₄-ММН: - сильне випромінювання у ІЧ-діапазоні (2,7, 6,3 μм (ІЧ-зона H₂O), 122 нм (УФ-зона H₂), CO₂ на 4,7 μм, CO на 4,3μм) - **слабке випромінювання в УФ- та видимому діапазонах** (за рахунок смуг CN, CO, N₂, NH₃ та інших проміжних і остаточних газоподібних продуктів реакції). Це дає **РОЖЕВО-ОРАНЖЕВО-ЖОВТИЙ колір, однак факел залишається частково прозорим**.

Тверді види палива і деякі рідкі палива також містять **тверді частинки: Al₂O₃ дає оранжево-білий факел**

Деякі види **рідкого палива** на основі **керосину** і більшість **твердих палив** містять незначний % **сажі** або дрібних **частинок вуглецю:**

- сильне випромінювання у ІЧ- та видимому діапазонах (**оранжевий факел** додатково до **смуг кольору «блакитний лебідь»**) і зон УФ-випромінювання (підсилених режимом форсажу)
- за наявності 2-5% **твердих частинок факел яскраво світиться**
- за наявності **окиснювача H₂O₂: факели, головним чином, з пари**

Видиме випромінювання **двокомпонентного палива може бути зменшене** або подавлене за рахунок **додавання** невеликої кількості **сполук калію (1-3%)**. Управління видимим випромінюванням композитних видів палива довело свою неефективність.

Неповністю окислені паливні сполуки (H₂, CO, NO, CH₂) реагують з O₂ у повітрі і згоряють, утворюючи H₂O, CO₂, NO₂ (більш висока температура);

Значні висоти сприяють посиленому розширенню (нижча температура), і окремі сполуки можуть конденсуватися і придбати рідкий стан, а надалі перетворитися на H₂O і CO₂, які утворюють хмари або інверсійний слід;

Усередині концентруються тяжчі молекули – CO₂, NO₂, CO, – у той час як найлегші молекули – H₂ і частина H₂O – тяжіють до зовнішніх зон.

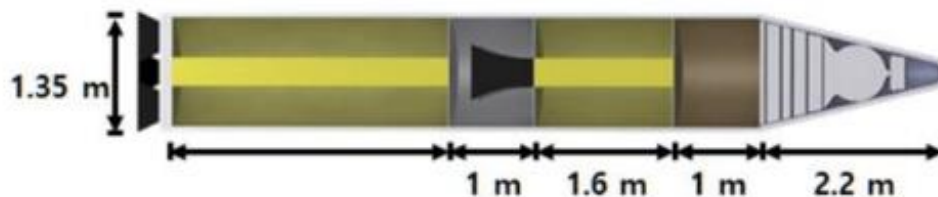
Пуккиксон-2 (1/2)

Дані/розрахунки з відкритих джерел:

- Вдосконалена версія рідкопаливної БРПЧ Пуккиксон-1 (KN-11);
- Клас «поверхня-поверхня», середня-велика дальність (БРСД);
- Тверде паливо;
- 2 ступені;
- На крутій траєкторії пікова висота 560 км, дальність = 500 км (на стандартній траєкторії – 1300 км);
- Маса = 16 тон

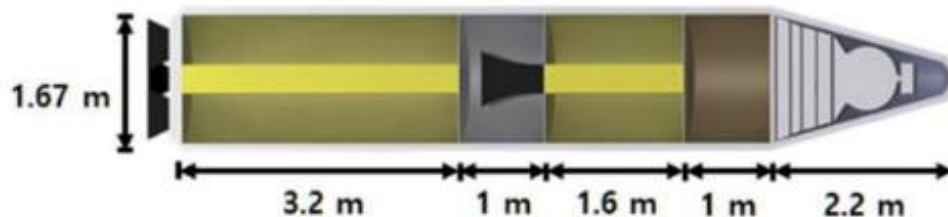
(1) Pukguksong-1 SLBM $L \approx 9 \text{ m}$

$D \approx 1.35 \text{ m}$



(2) Pukguksong-2 IRBM $L \approx 9 \text{ m}$

$D \approx 1.65 \text{ m}$



Пуккиксон-2 (2/2)

З фотографій можна робити висновок
про використання твердого палива
РДТП

Запалення, T0:

Дим може бути наслідком взаємодії з
остаточним димом піротехнічного
газогенератора

T0+3с.:

Частинки Al дають яскравий білий факел з
червоно-жовтим відтінком за рахунок
частинок вуглецю/сажі
Атмосферний тиск істотно зменшує
первинний дим

T0+12с.:

Вторинний дим від конденсації H_2O

Хвасон-12 (1/2)



Дані/розрахунки з відкритих джерел:

- Клас «поверхня-поверхня», середня-велика дальність,
- 1 сопло, 4 допоміжних двигуни,
- Рідке паливо,
- Один ступінь (розрахунково),
- Маса 28 тон (розрахунково)
- Довжина 16 м (розрахунково),
- На крутій траєкторії пікова висота 2111км у апогеї, дальність = 787 км (на стандартній траєкторії – 4500 км).

Хвасон-12 (2/2)



Основні характеристики факела:

- Добре видимий, червоного кольору
- Диски Маха
- Червона хвиля
- Непрозорий
- Майже немає диму/пари

Фото очевидно підтверджують використання РІДКОПАЛИВНОЇ рушійної системи на основі несиметричного диметилгідразину з червоною димлячою азотною кислотою (самозаймисте, не криогенне паливо)

Хвасон-14 (1/2)



Дані/розрахунки з відкритих джерел:

- Клас «поверхня-поверхня», середня-велика дальність,
- 1 сопло, 4 допоміжних двигуни,
- Рідке паливо,
- 2 ступені (розрахунково),
- Маса 36 тон (розрахунково),
- Дальність 6700-8000 км (розрахунково, на стандартній траєкторії, з важчим корисним навантаженням)
- Дальність >8000 км (розрахунково, на стандартній траєкторії, з легшим корисним навантаженням)
- На піку крутої траєкторії 3000 км у апогеї, дальність = 1500 км (час = 41 хв.)

Хвасон-14 (2/2)



Основні характеристики факела:

- Диски Маха
- Оранжевий колір хвиль
- Прозорий
- Без диму/пари

Фото очевидно підтверджують використання РІДКОПАЛИВНОЇ рушійної системи на основі несиметричного диметилгідразину з N_2O_4 (не криогенне, самозаймисте паливо)

Теплопередача випромінюванням

Інфрачервона сигнатура

Теплопередача випромінюванням: теорія (1/24)

Теплопередача випромінюванням і теплове випромінювання =

теплопередача, викликана електромагнітними хвилями

або фотонами



Випромінюються або поглинаються за рахунок зменшення/збільшення молекулярної енергії



Потужність і довжина хвилі випромінювання залежать від температури випромінювача



Тверді та рідкі речовини: електромагнітна теорія

Гази: квантова механіка

Теплопередача випромінюванням: теорія (2/24)

Електромагнітні хвилі:

- частота: ν [Гц];
- довжина хвилі: λ [м];
- хвильове число: η [м⁻¹];
- кутова частота: ω [радіанів/с];

Відношення:
$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = c\eta,$$

де c_η - швидкість світла у середовищі

Кожен фотон або кожна хвиля несе у собі певну кількість енергії:

$$\varepsilon = h\nu, \quad \text{де } h_\nu = \text{постійна Планка} = 6,62 * 10^{-34} \text{ Дж*с}$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (3/24)

- Спектральна потужність випромінювання: $E_v = \frac{W}{m^2 Hz}$;
- Спектральна потужність випромінювання абсолютно чорного тіла: $E_{bn}(T, n) = \frac{2phn^3 n^2}{c_0^2 [e^{hn/kT} - 1]}$
- Інтенсивність спектру: $I_v = \frac{W}{m^2 srHz}$

b_v – абсолютно чорне тіло

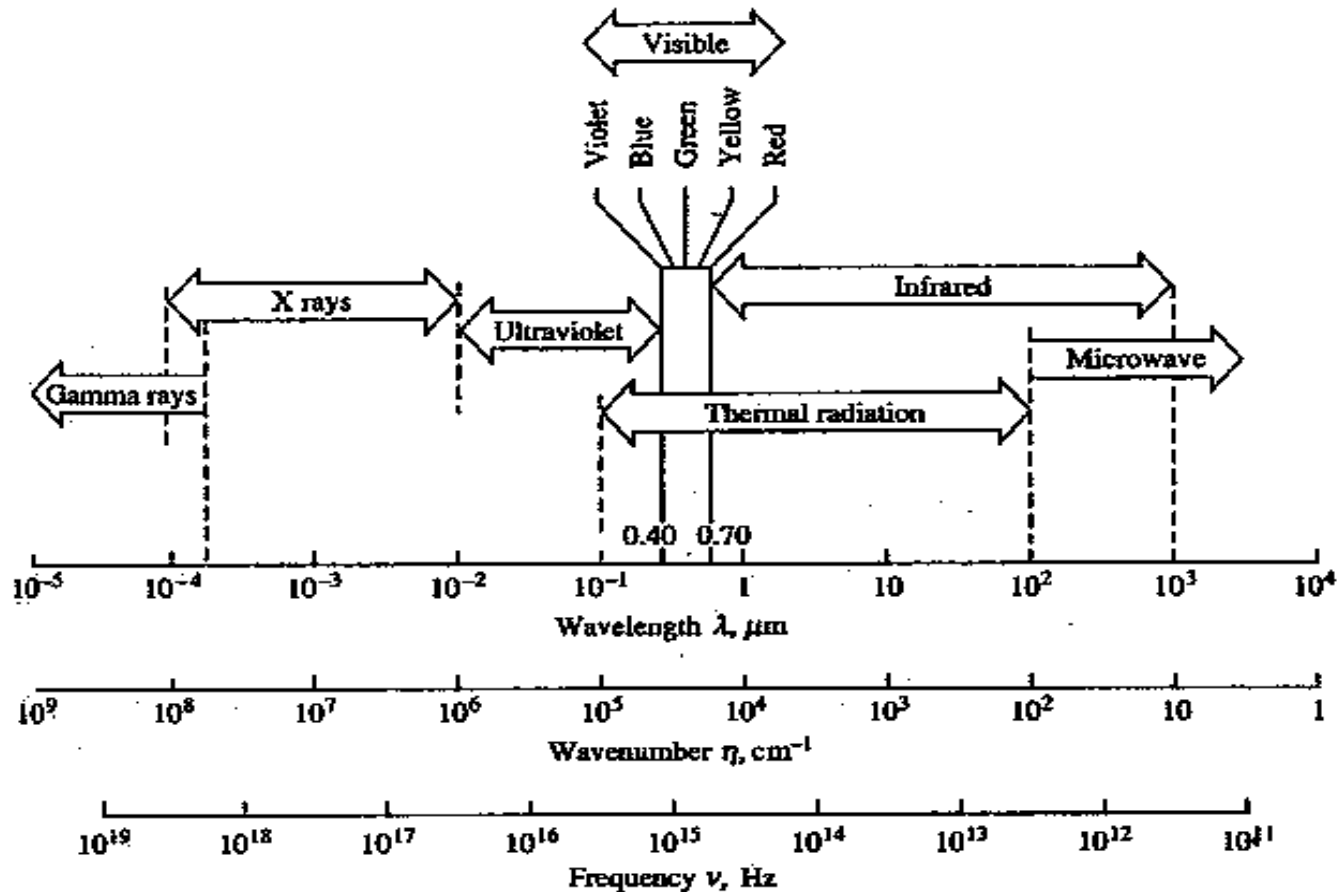
$K = 1,3806 * 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана

N^2 – індекс заломлення середовища

C_0^2 – швидкість світла у вакуумі

Чорна поверхня або ідеальний поглинач: непрозора поверхня, яка не відбиває жодного випромінювання – випромінює максимальну кількість променевої енергії (більш, ніж будь-яке інше тіло за той самий T)

Теплопередача випромінюванням: теорія (4/24)



← E

Нас цікавлять: **видимий діапазон**, $0,4\text{-}0,7\mu\text{m}$ ($1,4\text{-}2,5 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$; $4,3\text{-}7,9 \cdot 10^{14} \text{Гц}$)

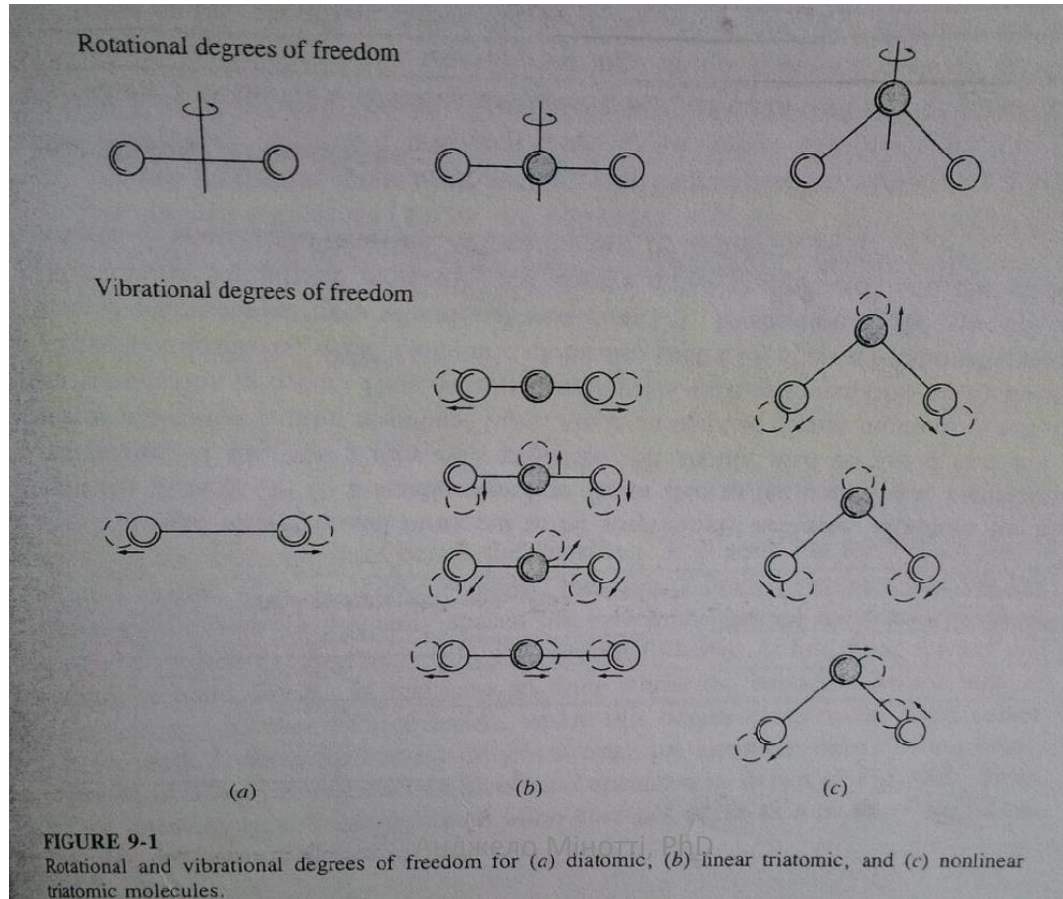
інфрачервоний діапазон, $0,7\text{-}10^3\mu\text{m}$ ($10\text{-}1,4 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$; $10^{11}\text{-}4,3 \cdot 10^{14} \text{Гц}$)

Теплопередача випромінюванням: теорія (5/24)

Властивості газів

Атоми і молекули газу несуть:

- Енергію поступального руху (кінетичну);
- Енергію обертowego руху, вібрації ($3N-3$) та електронну енергію (внутрішні ступені свободи)



Теплопередача випромінюванням: теорія (6/24)

Властивості газів

Поглинення фотону молекулою: ПІДВИЩУЄ рівень одного з внутрішніх енергетичних станів;

Вивільнення фотону: ЗМЕНШУЄ рівень одного з внутрішніх енергетичних станів.

Постулати квантової механіки:

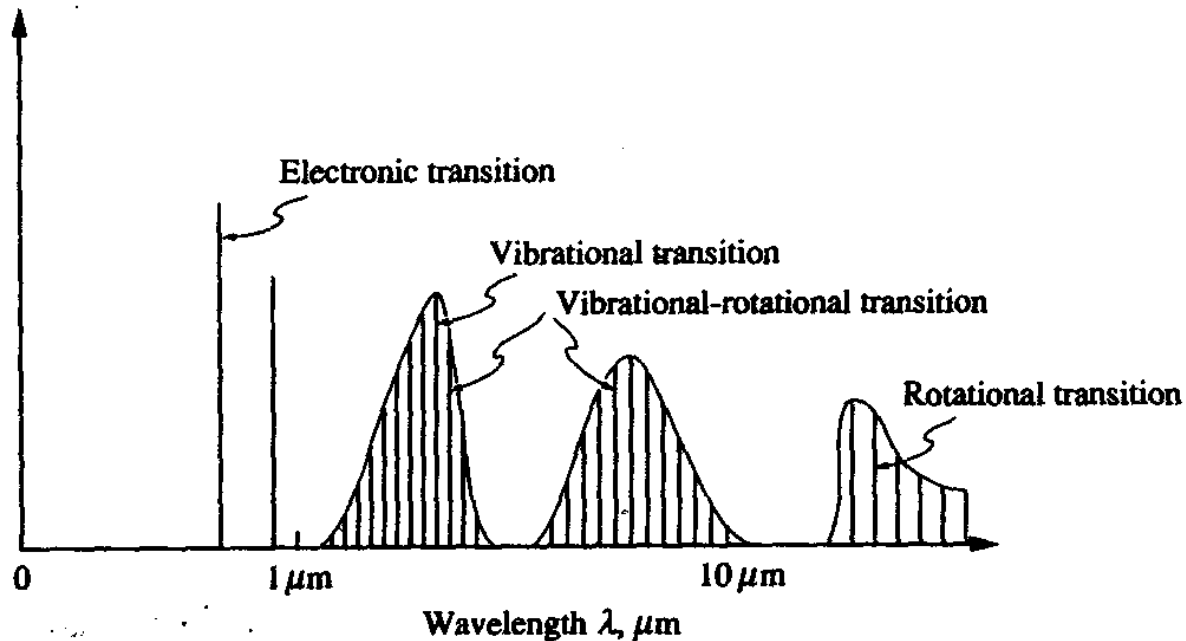
Можливе лише обмежене число дискретних рівнів енергії, тому:

Зміна внутрішньої енергії молекулярного газу може лише руйнувати або генерувати фотони з визначеними рівнями енергії $h\nu$.

Теплопередача випромінюванням: теорія (7/24)

Властивості газів

<u>Зміна внутр. енергії</u>	<u>Супутня енергія</u>	<u>Довжина хвилі</u>	<u>Спектр</u>
Орбіта електрона	10^8 Гц x год.	10^{-2} - $1,5$ μm	УФ – майже ІЧ
Вібраційна	10^6 Гц x год.	$1,5$ – 20 μm	Інфрачервоний
Обертова	10^5 Гц x год.	> 20 μm	Дальній ІЧ



Властивості газів

Перехід з поглиненням або вивільненням фотону:

- *«зв'язано-зв'язаний»*: іонізація до і після відсутня;
- *«зв'язано-вільний»*: поглинення фотону має наслідком виникнення іонізації та вивільнення електрона
- *«вільно-зв'язаний»*: навпаки, вільний електрон може комбінуватися з іоном, генеруючи фотон
- *«вільно-вільний»*: вільний електрон може поглинати або випускати фотони

Нас цікавлять «зв'язано-зв'язані» переходи

Теплопередача випромінюванням: теорія (9/24)

Властивості газів

- Провідність однорідного ізотермічного шару газу:

$$\tau_{\eta} = e^{-\kappa_{\eta} S} \quad 0 < \tau_{\eta} ,$$

S – товщина шару газу;

κ_{η} – коефіцієнт поглинення;

- Поглинаюча здатність шару газу:

$$\alpha_{\eta} = 1 - \tau_{\eta} = 1 - e^{-\kappa_{\eta} S} \quad 0 < \alpha_{\eta} < 1$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (10/24)

Властивості газів

З процеси ведуть до вивільнення або захоплення фотону:

1. Спонтанне випромінювання;
2. Вимушене випромінювання;
3. Вимушене поглинення.

Коефіцієнти відносного поглинення та випромінювання можуть бути розраховані засобами квантової механіки.

Теплопередача випромінюванням: теорія (11/24)

Властивості газів

При:

✓ n_i (j): атоми або молекули (на одиницю об'єму) в енергетичному стані « i (j)», де $j < i$;

Число переходів від « i » до « j » шляхом вивільнення фотону з енергією $h\nu$ дорівнює:

$$\left(\frac{dn_i}{dt} \right)_{i \rightarrow j} = -A_{ij} n_i \quad (1)$$

де:

- ✓ знак «мінус» означає вивільнену енергію
- ✓ A_{ij} означає коефіцієнт Ейнштейна для спонтанного випромінювання

Спонтанне випромінювання є ізотропним

Теплопередача випромінюванням: теорія (12/24)

Властивості газів

Вимушене випромінювання: випромінювання, яке надходить з відповідною частотою, може змусити молекули вивільняти фотони у тому ж напрямку, що й вхідне випромінювання

Відтак, загальне число переходів зі стану «i» до стану «j» дорівнює:

$$\left(\frac{dn_i}{dt} \right)_{i \rightarrow j} = -n_i \left(A_{ij} + B_{ij} \int_{4\pi} I_\nu d\Omega \right)$$

де:

- ✓ B_{ij} означає коефіцієнт Ейнштейна для вимушеного випромінювання;
- ✓ I_ν означає інтенсивність вхідного випромінювання, яка має бути інтегрована для всіх напрямків, Ω , аби врахувати усі можливі переходи

Теплопередача випромінюванням: теорія (13/24)

Властивості газів

Вимушене поглинення: частина інтенсивності вхідного випромінювання може поглинатися молекулами у енергетичному стані «j»:

$$\left(\frac{dn_j}{dt} \right)_{j \rightarrow i} = n_j B_{ji} \int_{4\pi} I_\nu d\Omega$$

де:

- ✓ B_{ji} означає коефіцієнт Ейнштейна для поглинення;
- ✓ I_ν означає інтенсивність вхідного випромінювання.

Для рівноважного випромінювання одержуємо:

$$\left(\frac{dn_i}{dt} \right)_{i \rightarrow j} + \left(\frac{dn_j}{dt} \right)_{j \rightarrow i} = -n_i \left(A_{ij} + B_{ij} \int_{4\pi} I_\nu d\Omega \right) + n_j B_{ji} \int_{4\pi} I_\nu d\Omega = 0 \quad (2)$$

$$A_{ij} = \frac{8\pi h \nu^3}{c_0^2} B_{ij}; \quad B_{ij} = B_{ji}$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (14/24)

Властивості газів

Беручи лише вимушену частину рівняння (2) і помножуючи її на енергію $h\nu$, отримуємо:

$$\frac{dl_\nu}{ds} = -h_\nu \frac{d}{d\Omega} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{j \rightarrow i} = -(n_j B_{ji} - n_i B_{ij}) h_\nu l_\nu ,$$

де s – відстань вздовж пучка променів

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu I_\nu$$

Де лінійний спектральний коефіцієнт поглинення:

$$\kappa_\nu = (n_j B_{ji} - n_i B_{ij}) h_\nu$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (15/24)

Властивості газів

Помноживши член рівняння (1), який відповідає спонтанному діленню, на енергію $-h\nu$ і поділивши його на Ω , одержуємо ізотропну енергію, випромінену на одиницю часу/одиницю об'ємного кута/одиницю площі/одиницю відстані вздовж пучка променів;

Нижче показано, як інтенсивність випромінювання на одиницю відстані міняється через спонтанне випромінювання:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -h\nu \frac{d}{d\Omega} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{i \rightarrow j} = \frac{n_i A_{ij} h\nu}{4\pi} = \kappa_\nu I_{b\nu}$$

Складаючи члени спонтанного ділення і вимушеного ділення та поглинення, одержуємо повне спектральне рівняння для середовища, яке поглинає, випромінює, але не розсіює:

$$\frac{dl_\nu}{ds} = \hat{s} I_\nu = \kappa_\nu (I_{b\nu} - I_\nu)$$

\hat{s} – версор поширення

Теплопередача випромінюванням: теорія (16/24)

Властивості газів

Інтегруємо на об'ємний кут:

$$\int_{4\pi} \hat{s} I_\nu d\Omega = \int_{4\pi} \kappa_\nu (I_{b_\nu} - I_\nu) d\Omega$$

$$\int_{4\pi} \hat{s} I_\nu d\Omega q_\nu = 4\pi \kappa_\nu I_{b_\nu} - \int_{4\pi} \kappa_\nu I_\nu d\Omega ,$$

де

$$q_\nu - \text{спектральна теплопередача} = \frac{W}{\text{м}^2 \text{Гц}}$$

Інтегруємо на діапазон частот:

$$\nabla \cdot \mathbf{q}_{rad} = \nabla \cdot \int q_\nu d\nu$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (17/24)

Властивості газів

Додаємо до загального рівняння енергії член випромінювальної енергії:

$$\rho \frac{D(e+v^2/2)}{Dt} = -\nabla \cdot q_{tot} - p\nabla \cdot V + V_i \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

де

$e \equiv$ внутрішня енергія = $e_{\text{перех}} + e_{\text{оберт}} + e_{\text{вібрац}} + e_{\text{електр}} + (\Delta h_f)^0$

$\Delta h_f^0 \equiv$ ентальпія утворення

$V \equiv$ вектор швидкості

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$q_{tot} \equiv q_{rad} + q_{conv} + q_{diff}$$

$$q_{conv} \equiv \text{конвекційний тепловий потік} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

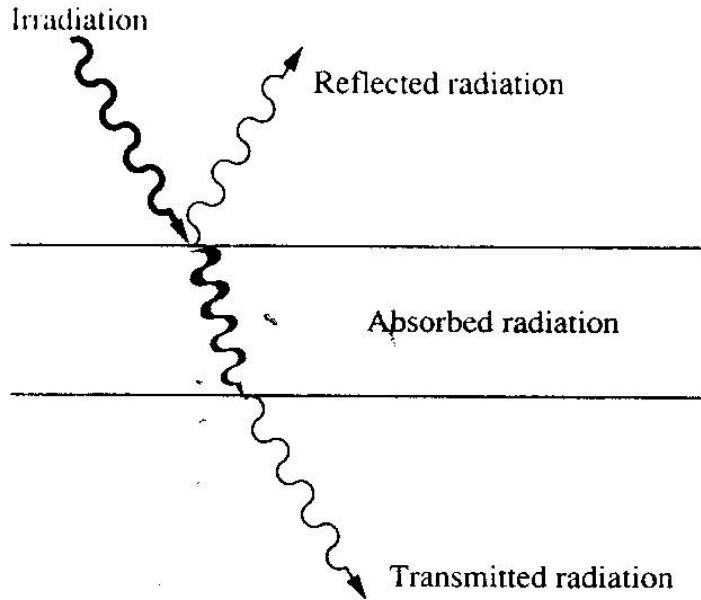
$$q_{diff} \equiv \text{тепловий потік молекулярної дифузії} = \sum_m \rho_m \vec{U}_m h_m$$

$$\vec{U}_m \equiv \text{швидкість дифузії у сполуці } m$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (18/24)

Властивості твердих речовин

Визначення:



відбивна здатність,

$$\rho = \frac{\text{відбита частина вхідного випромінювання}}{\text{загальне вхідне випромінювання}}$$

поглинальна здатність,

$$\alpha = \frac{\text{поглинена частина вхідного випромінювання}}{\text{загальне вхідне випромінювання}}$$

провідність,

$$\tau = \frac{\text{передана частина вхідного випромінювання}}{\text{загальне вхідне випромінювання}}$$

отже:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

$$\text{коефіцієнт випромінювання, } \varepsilon = \frac{\text{енергія, випромінена поверхнею}}{\text{енергія, випромінена чорною поверхнею за тієї ж температури}}$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (19/24)

Властивості твердих речовин

Примітки:

- ✓ Вказані 4 властивості можуть бути функціями температури і довжини хвилі;
- ✓ Поглинальна здатність може бути різною для різних напрямів опромінення;
- ✓ Коефіцієнт випромінювання може бути різним для різних напрямків виходу;
- ✓ Величина відбивної здатності і провідності може залежати як від вхідного, так і від вихідного напрямів.

Розрізняють спектральні та загальні значення властивостей (середні значення для спектру), а також спрямовані та напівсферичні властивості (середні значення для усіх напрямків)

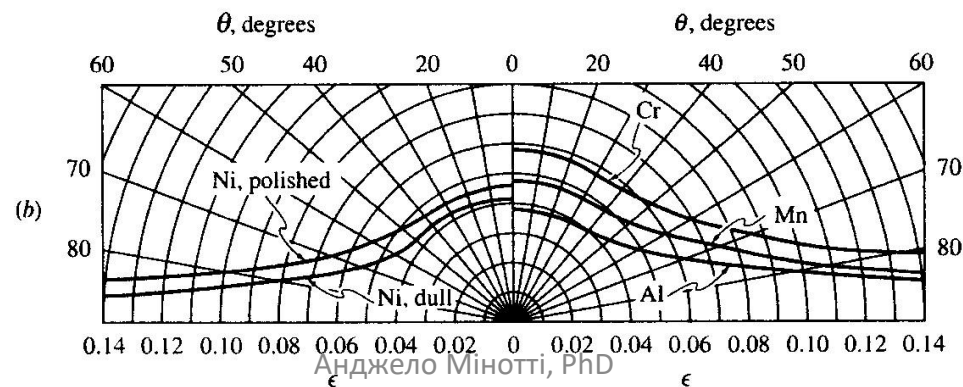
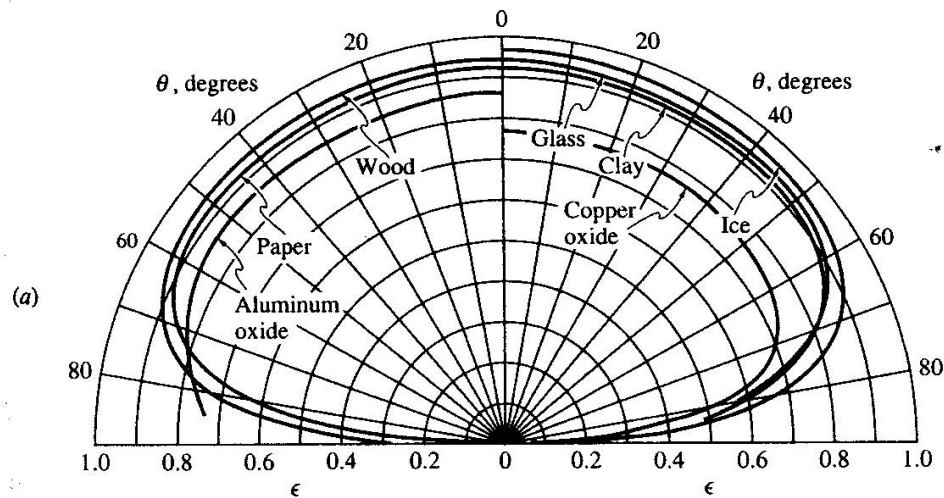
Теплопередача випромінюванням: теорія (20/24)

Властивості твердих речовин

Спрямований варіант поверхневого коефіцієнта випромінювання:

(a) неметали;

(b) метали



Теплопередача випромінюванням: теорія (21/24)

Властивості твердих речовин

Визначення:

- ✓ **дифузний випромінювач ламбертової поверхні:** спектральна поверхня, чий коефіцієнт випромінювання однаковий для усіх напрямків (нереально)
- ✓ **сіра поверхня:** спектральний коефіцієнт випромінювання однаковий для усіх довжин хвилі;

Особливий приклад *сірої та ламбертової поверхонь*:

$$\varepsilon(T) = \varepsilon_\lambda = \varepsilon' = \varepsilon'_\lambda$$

$$\varepsilon' - \text{спрямований коефіцієнт випромінювання} = \frac{I_\lambda(T, \lambda, \hat{s})}{I_{b\lambda}(T, \lambda)}$$

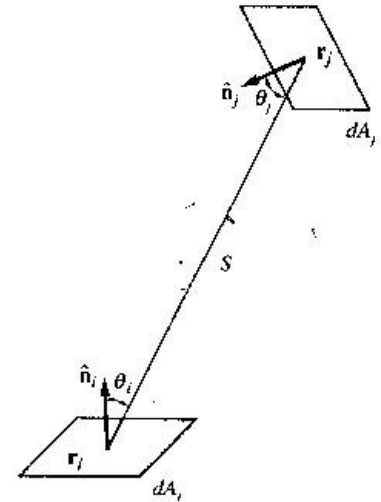
Реально сірих поверхонь не існує, однак їх можна припустити у діапазоні $E_{b\lambda} = \text{макс.}$

Теплопередача випромінюванням: теорія (22/24)

Властивості твердих речовин

Енергообмін між двома поверхнями, в залежності від їх:

1. розміру;
2. відстані;
3. орієнтації;



$$dF_{dA_i \rightarrow dA_j} = \frac{\text{розсіяна енергія, що виходить з } dA_i \text{ прямо у напрямку } dA_j}{\text{загальна розсіяна енергія, що виходить з } dA_i}$$

Прямо \equiv на прямій траєкторії, без проміжних відбить

Інтенсивність теплопередачі від dA_i до dA_j :

$$I(r_i)(dA_i \cos \theta_i) d\Omega_i = I(r_i) \cos \theta_i \cos \theta_j dA_i dA_j / S^2$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (23/24)

Властивості твердих речовин

Повна променева енергія, що виходить з dA_i до півкулі над нею:

Пр.: розсіююча поверхня

$$J(r_i)dA_i = [E(r_i) + \rho(r_i)H(r_i)]dA_i = \pi I(r_i)dA_i$$

Коефіцієнт видимості між 2 нескінченно малими поверхнями:

$J = E + \rho H$ – дифузне відбиття
E – коефіцієнт випромінювання;
 ρH – відбивна здатність;

$$dF_{dA_i \rightarrow dA_j} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^2} dA_j$$

Заміняючи «і» на «j», одержуємо закон взаємозамінності:

$$dA_i dF_{dA_i \rightarrow dA_j} = dA_j dF_{dA_j \rightarrow dA_i}$$

Теплопередача випромінюванням: теорія (24/24)

Властивості твердих речовин

Коефіцієнт видимості між нескінченно малою і скінченною поверхнями:

$$F_{dA_i \rightarrow A_j} = \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^2} dA_j$$

$$dA_i F_{dA_i \rightarrow A_j} = A_j dF_{A_j \rightarrow dA_i}$$

Коефіцієнт видимості між двома скінченними поверхнями:

$$F_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^2} dA_j$$

$$A_i F_{A_i \rightarrow A_j} = A_j F_{A_j \rightarrow A_i}$$

Методи:

1. Пряме інтегрування;
2. Метод Монте-Карло: статистика;
3. Спрощені методи для простих геометрій.

Приклад

СОПЛО ТВЕРДОПАЛИВНОГО ДВИГУНА

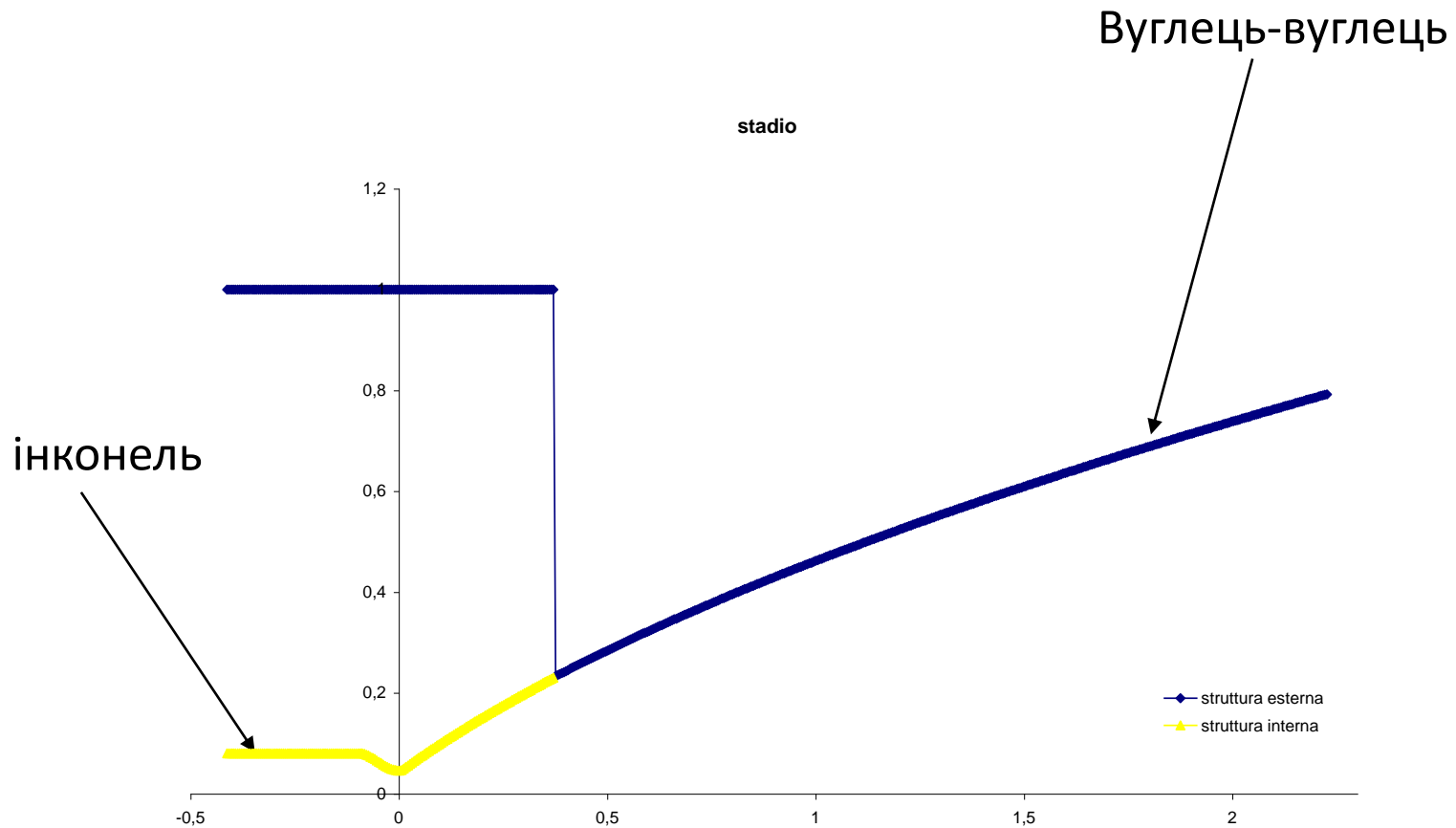
I

ФАКЕЛ

Приклад (2)

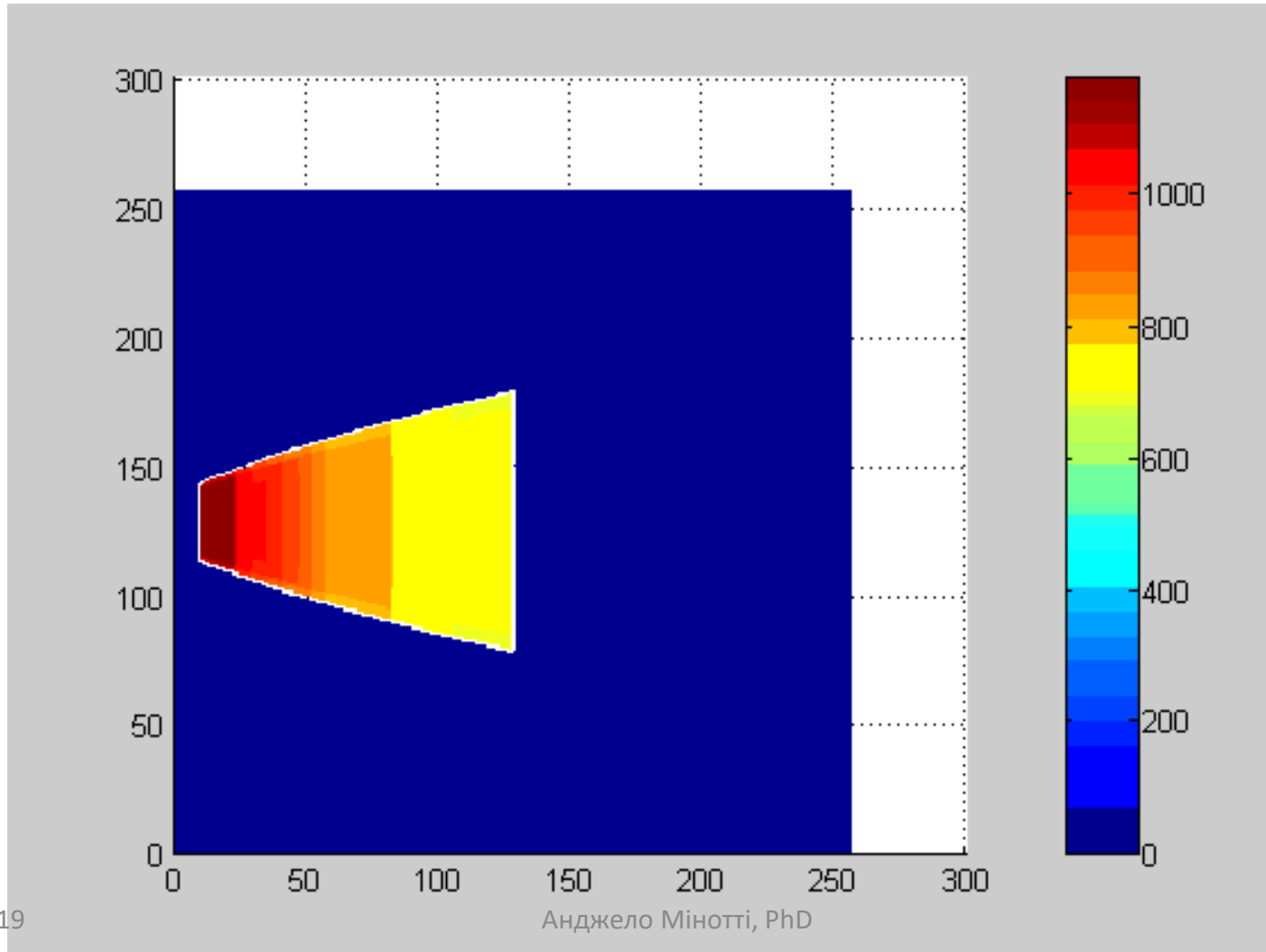
Зовнішній радіус СОПЛА: 0,792м;

Радіус ступеня: 1м;



Приклад (3)

Зовнішня температура сопла

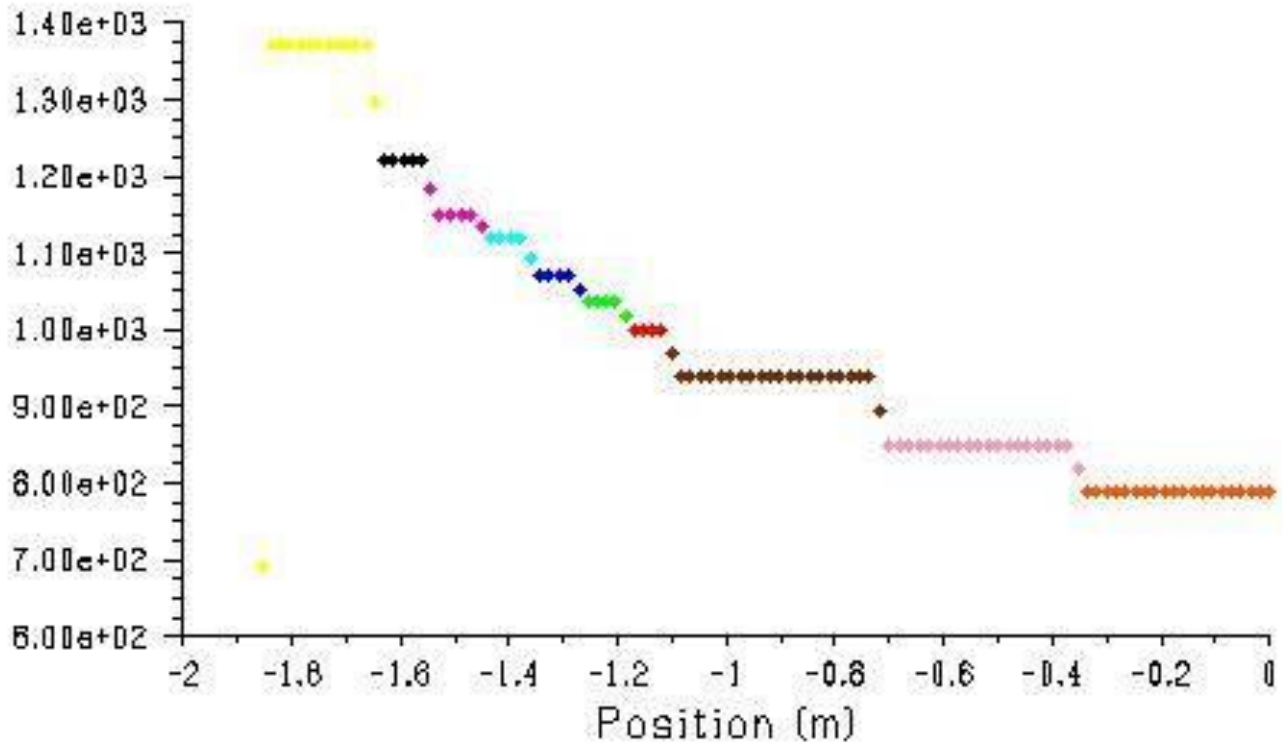


Приклад (4)

Зовнішня температура сопла: осьова поведінка

◆	nozzle1220
◆	nozzle10000
◆	nozzle10335
◆	nozzle10700
◆	nozzle11200
◆	nozzle11500
◆	nozzle13700
◆	nozzle7000
◆	nozzle8500
◆	nozzle9400

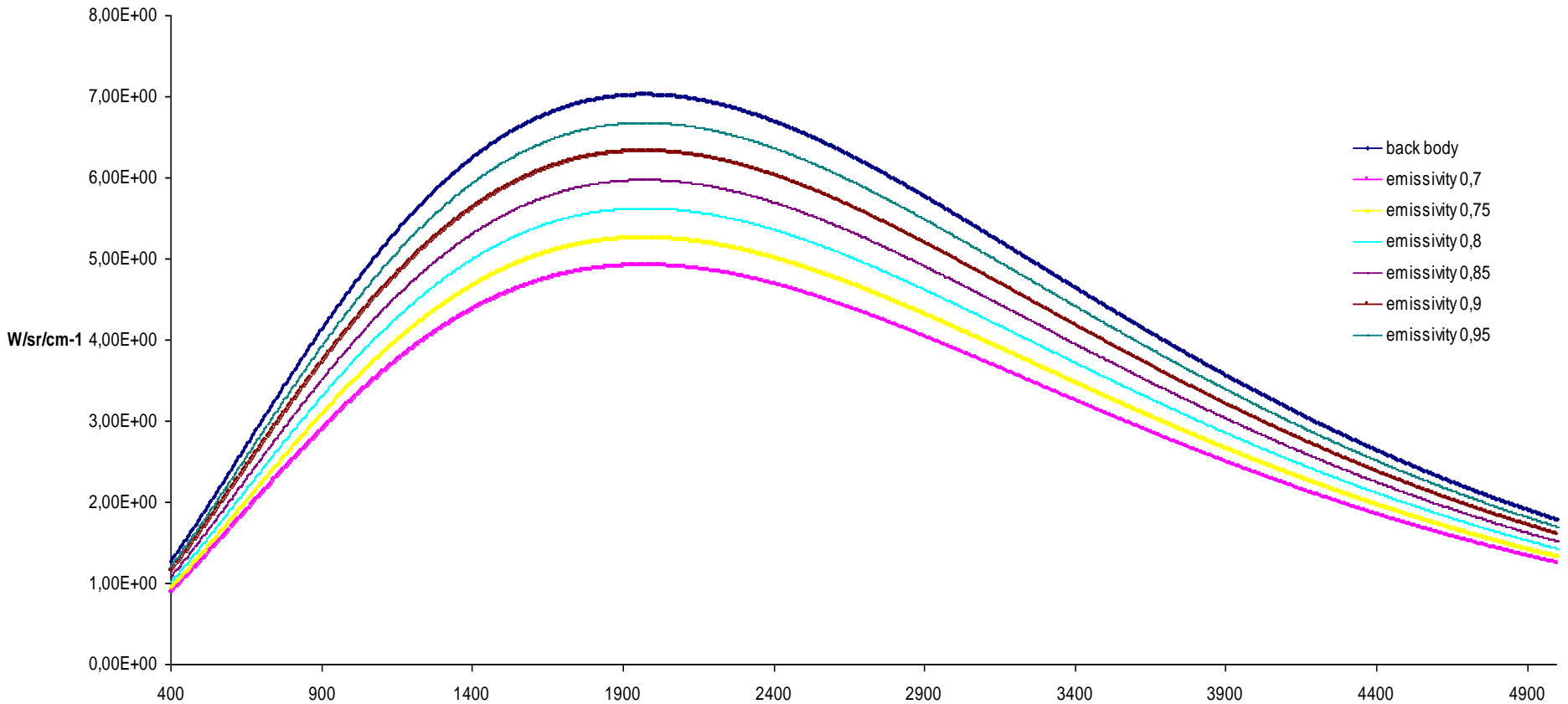
Static
Temperature
(k)



Приклад (5)

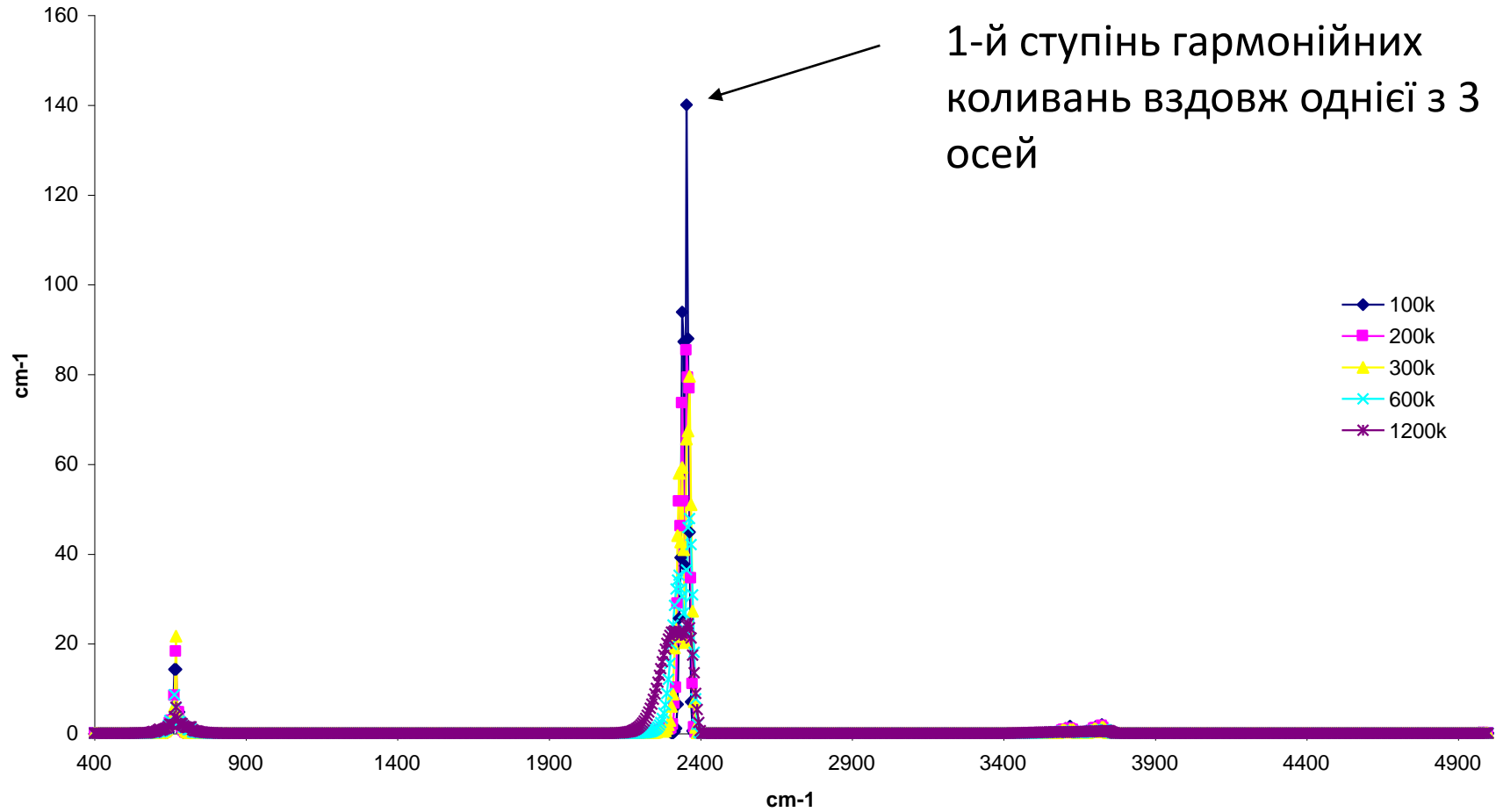
Інтенсивність випромінювання сопла як функція коефіцієнта випромінювання

infrared spectral intensity -ugello



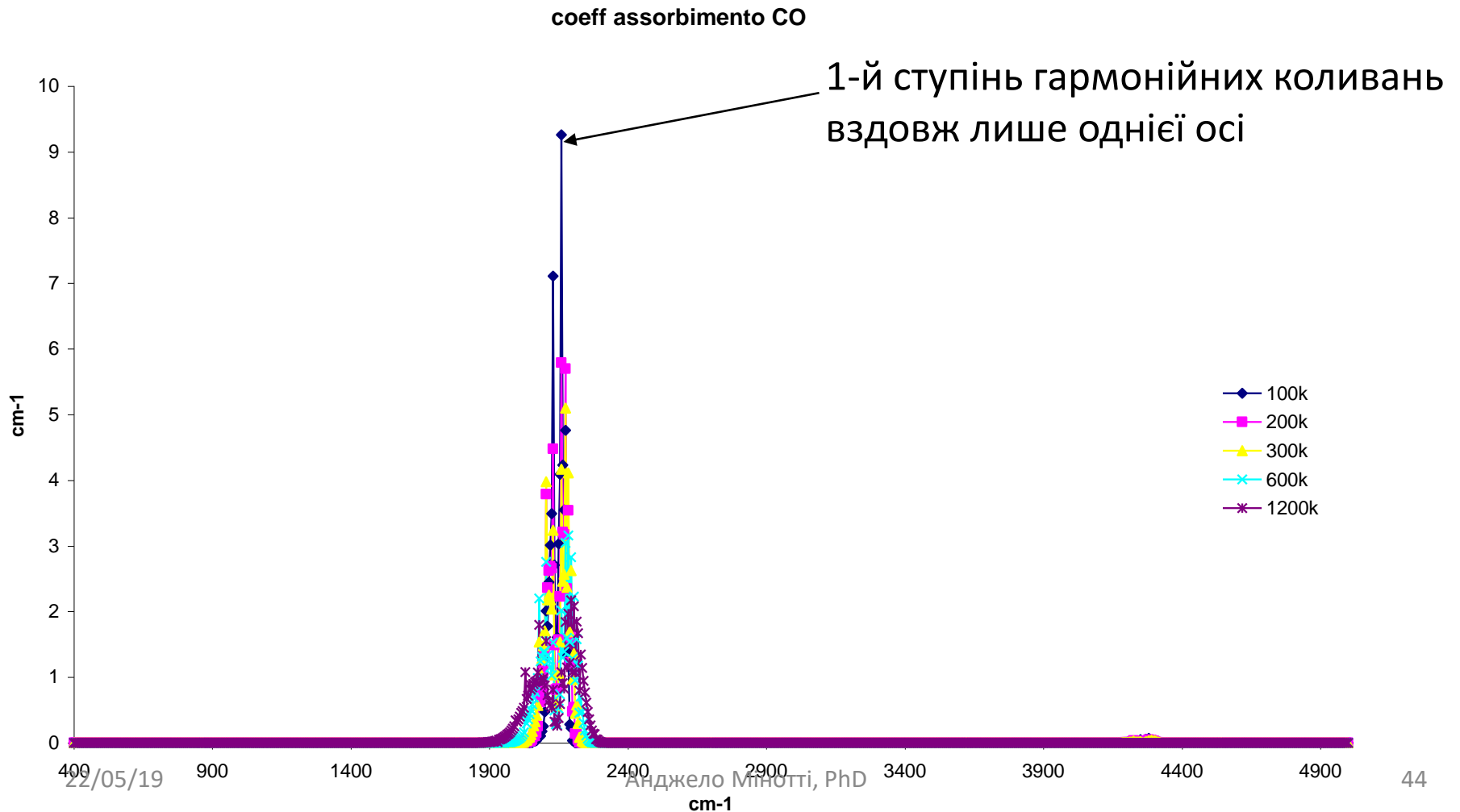
Приклад (б), факел

coeff assorbimento CO2

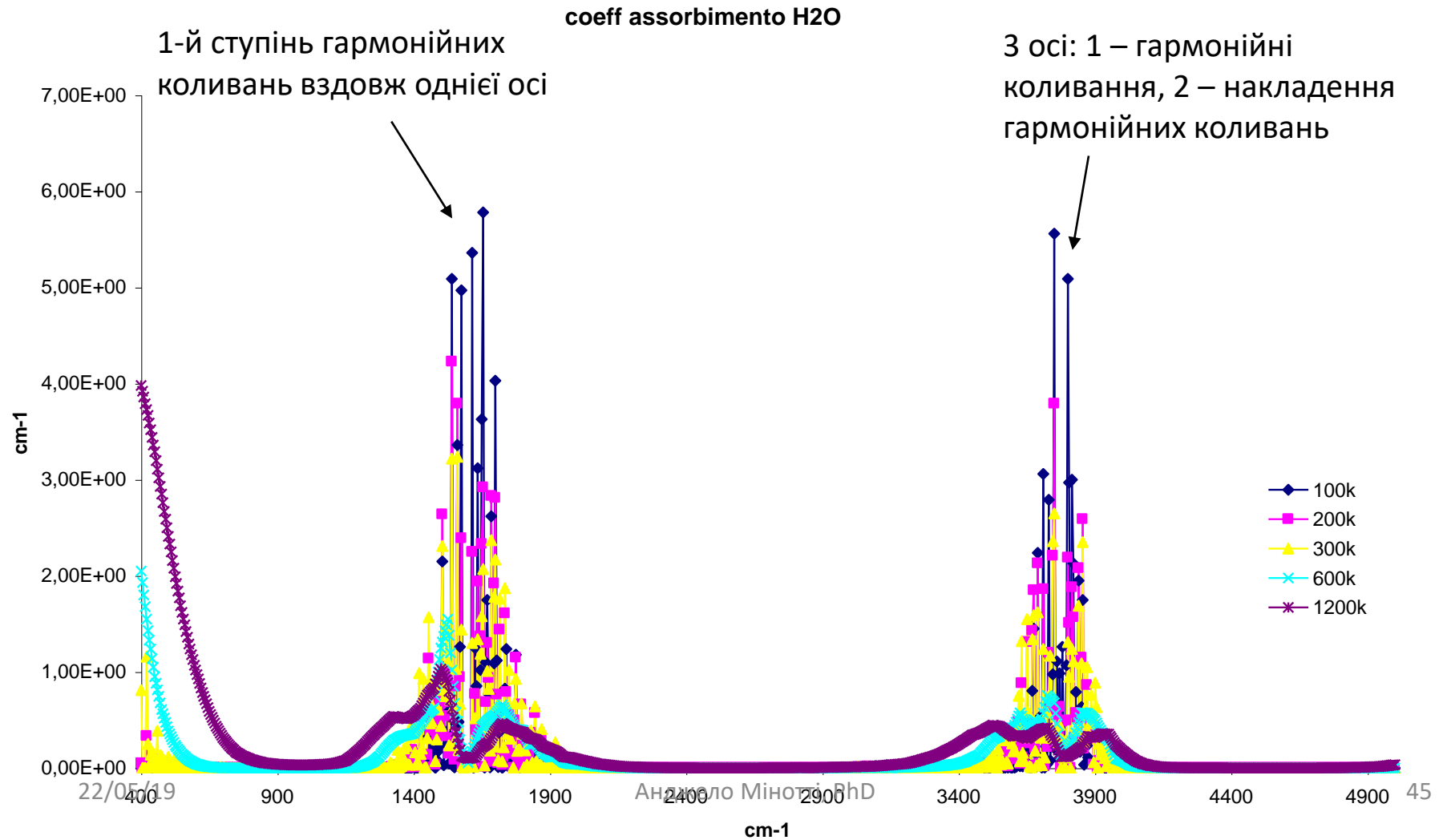


РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ = 5cm^{-1}

Приклад (7), факел

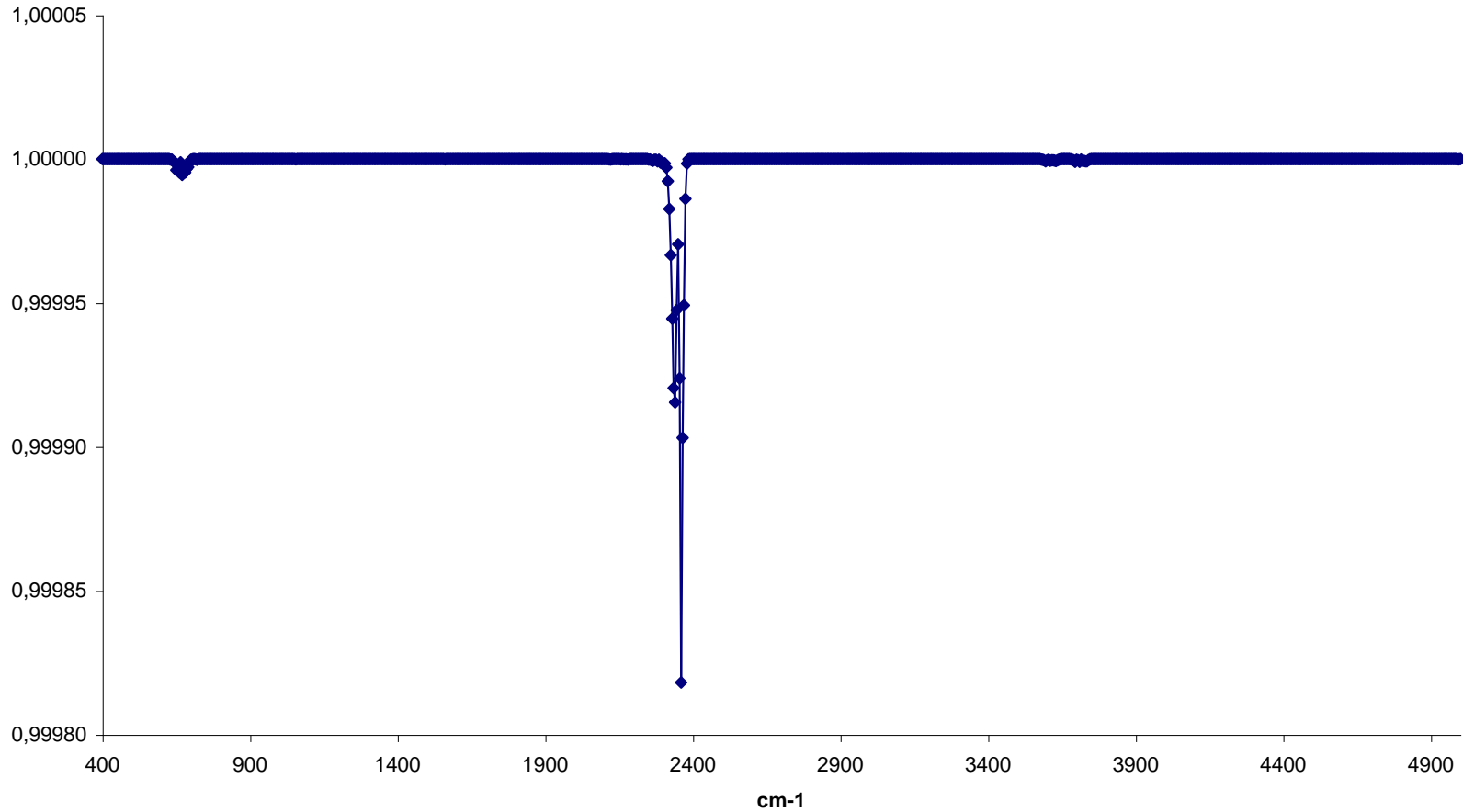


Приклад (8), факел

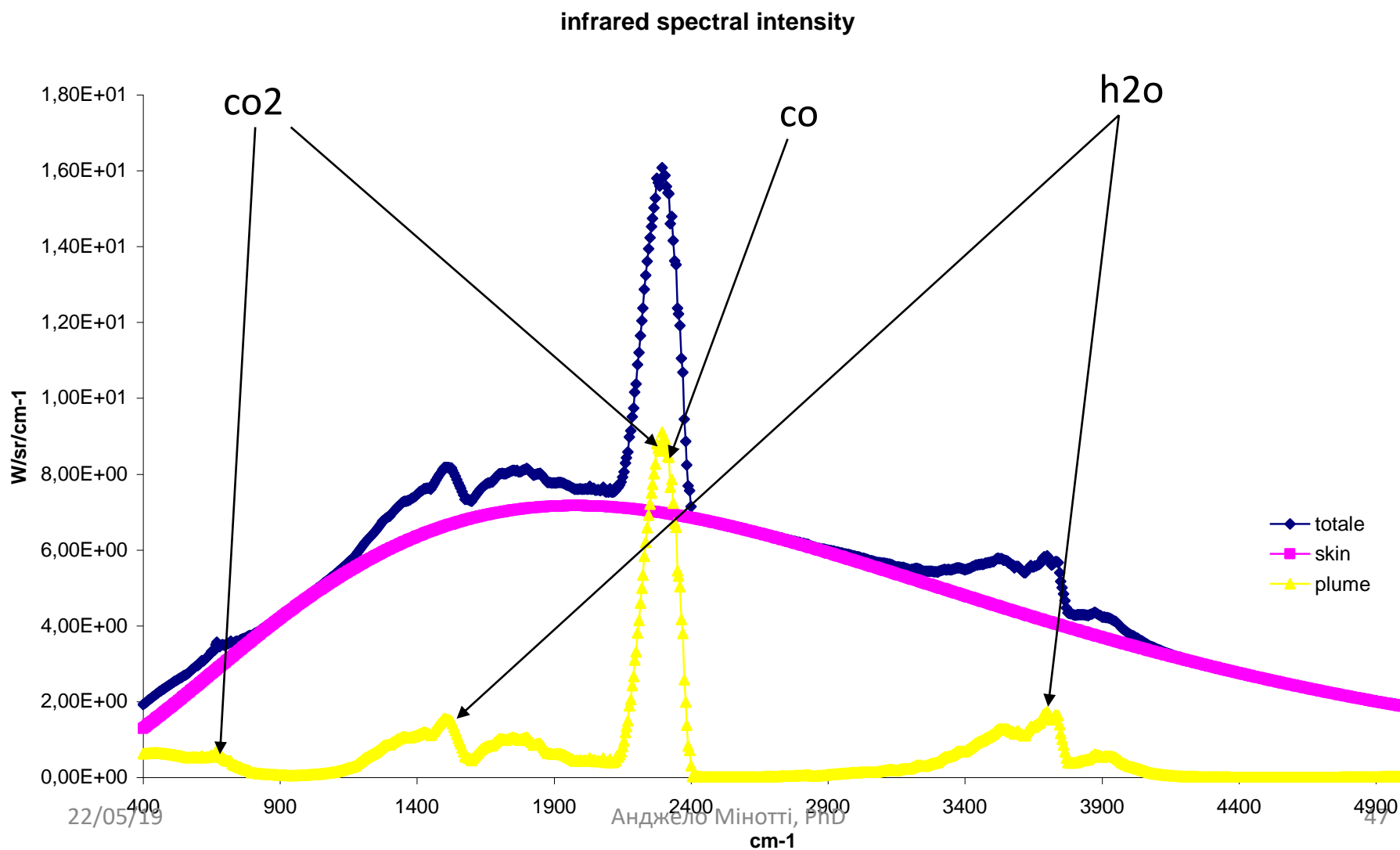


Приклад (9), атмосфера на 90 км

trasmissività atmosfera



Приклад (10), повна інтенсивність випромінювання



Дякую

dualuse-armscontrol@angelominotti.com

info@angelominotti.com

www.angelominotti.com